

# 青海祁漫塔格成矿带地球物理方法找矿有效性试验

高 鹏 耿 涛 冀显坤 杜 辉 白 运 田中英 刘生荣

( 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室 中国地质调查局西安地质调查中心 陕西西安 710054)

[摘 要] 随着青海祁漫塔格成矿带矿产地质调查工作的深入开展, 地球物理勘探方法在该地区地质找矿中, 特别是在隐伏矿床找矿中发挥着越来越重要的作用。通过对青海祁漫塔格成矿带中地形地貌特征具有代表性的夏日哈木镍矿区及其外围这一区域开展重力、磁测、激电中梯、可控源音频大地电磁测深、天然场源电磁测深等地球物理勘探的有效性试验及示范工作, 证明在解决好施工过程中的一些技术问题后, 这些方法在青海祁漫塔格成矿带的地质矿产调查工作中都是有效的。通过进一步总结认为, 在该地区利用地球物理勘探方法进行重点区域调查时, 应首先开展大于 1:1 万比例尺的高精度磁测、重力和激电中梯工作, 细分异常, 在此基础上, 开展激电测深和电磁测深, 以确定地下地质体的深度, 进而通过综合研究, 对其成矿前景进行评价。本文对方法有效性的认识, 可作为在青海祁漫塔格成矿带开展地质矿产调查工作时地球物理勘探方法选择的参考。

[关键词] 地球物理勘探方法 青海 祁漫塔格 有效性试验

[中图分类号] P631 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2017)05-12

DOI:10.13712/j.cnki.dzykt.2017.05.009

Gao Peng ,Geng Tao ,Ji Xian-kun ,Du Hui ,Bai Yun ,Tian Zhong-ying ,Liu Sheng-rong. Effective-ness experiments of geophysical methods in the Qimantage metallogenic belt of Qinghai Province [J]. *Geology and Exploration* 2017 53(5):0923-0934.

## 1 引言

青海省祁漫塔格成矿带地处青藏高原东北部柴达木盆地西南缘,是青海东昆仑成矿带西部的重要组成部分。据“青海省矿产资源潜力评价”项目对青海省大地构造单元的划分结果,该区的大地构造位置在区域上属于秦祁昆造山系一级构造单元中的东昆仑弧盆系二级构造单元,位于祁漫塔格蛇绿混杂岩带(北部)和北昆仑岩浆弧(南部)两个三级构造单元的结合部位,是西北地区一条重要的成矿带。该区矿产资源丰富,是青海省重要的铁、铜多金属矿产基地之一,也是中国新的十大资源接替基地之一。区内目前已探明的金属矿床主要有夏日哈木镍矿、卡尔却卡铜矿、乌兰乌珠尔铜矿、鸭子沟铜矿、肯德可克铜铁多金属矿、景忍铁铜多金属矿、群力铁铜多金属、虎头崖铜铅锌矿、四角羊沟铅锌矿、野马泉铅锌矿、金鑫铅锌矿、尕林格铁矿等,主要矿种有铁、铜、镍、钴、铅锌等,主要矿床类型有矽卡岩型、热液

(热液改造)型及斑岩型等。

随着青海省祁漫塔格成矿带矿产地质调查工作的深入开展,地球物理勘探在该地区地质找矿和地球科学研究中发挥着越来越重要的作用,特别是在隐伏矿床找矿中作用更为突出。然而,由于青海省祁漫塔格成矿带自然景观属柴达木盆地南缘半干旱荒漠化草原区和东昆仑山脉西段的结合区,区内大部分以高山为主,山势陡峻,切割剧烈,沟壑纵横,北部为盆地边缘覆盖区,地势较平坦,但第四系覆盖厚度可达 20~75m,据钻探结果,部分地区覆盖厚度可达 160~250m;同时,区内属典型高寒干旱内陆高原盆地气候,多风少雨,蒸发强烈,地表干旱,地貌以沙漠、戈壁为主,山区也基本为风成砂覆盖,山前风成砂堆积更甚,形成多处大型流动砂梁或砂丘。这些地貌特征又极大地限制了地球物理勘探方法的应用。

李东生等(2013)和何书跃等(2013)已对祁漫塔格地区有效找矿方法进行了总结,但针对地球物

[收稿日期]2017-05-15; [修改日期]2017-07-23; [责任编辑]衣俊杰。

[基金项目]中国地质调查局“青海祁漫塔格成矿带金属矿地质矿产调查”项目(编号:12120113031600)和“东昆仑铜镍多金属资源基地调查”二级项目(编号:DD20160013)联合资助。

[第一作者]高 鹏(1982 年-)男,工程师,主要从事地球物理勘探工作。E-mail:gaomou24@163.com。

理勘探方法的应用却较少且不系统。前人之所以在该地区地球物理勘探工作成果较少且方法单一主要是因为该地区地形复杂,野外工作不易开展,重力工作地形改正非常困难。因此,大比例尺重力工作基本没有部署;尽管激电中梯、激电测深等方法对于寻找隐伏矿具有很好的指导作用(俞胜等,2016),该地区也开展了少量的电法工作,但由于地表干旱,电法工作接地条件较差,供电效果不佳,造成测量效果不好,以至于一般认为在该地区不宜开展电法工作。因此,以往的地质矿产调查工作中采用的地球物理勘探方法以技术方法简单、仪器轻便灵活的地面磁测为主。

各种地球物理勘探方法的应用都依据其物性前提,而地质、地球物理条件和边界特征对勘探成果具有较大的影响,使得每种方法技术都存在着一定的条件性和局限性,加之隐伏金属矿大多具有比较复杂的地质特征,所以采用单一的地球物理勘探方法一般难以查明或解决有关地质问题。因此,采用综合地球物理勘探技术和综合分析解释,使各方法成果相互佐证,取长补短是提高地球物理勘探资料解释精度和可靠性的必由之路。那么在祁漫塔格地区的矿产地质调查工作中要开展地球物理勘探,除磁测之外其他方法有效性究竟如何?以往效果不佳的方法是真的不宜开展还是需要改进其工作技术?

基于此,中国地质调查局在该地区部署了多个勘查技术试验及应用示范项目,旨在通过选择典型矿床(带)开展地球物理勘探方法有效性试验解决以上问题。

## 2 地球物理勘探方法有效性试验

为了达到试验目的,首先需要选择合适的试验区。试验区应满足以下条件:有已知矿体,勘探程度高,资料丰富,有大量钻孔资料;交通情况相对便利;地形地貌条件基本满足待试验的各种方法施工需要;在已知矿体附近有成矿有利区,以便进行技术应用示范。

夏日哈木镍矿是近年在青海祁漫塔格成矿带新发现的一处超大型镍矿(杨启安等,2015),矿区地形为近环形的高峻陡直山地加中央小型凹地,地表被风成砂覆盖,外围地形地貌特征与矿区基本一致。其地形地貌特征在整个青海祁漫塔格成矿带具有较强的代表性,且矿区已基本完成勘探工作,钻探控制程度较高,是一处理想的试验区。经实地踏勘,试验剖面选择在矿体中部地形条件相对复杂但又能保证

人员、仪器到达的7号勘探线进行,如图1所示。夏日哈木镍矿床为一岩浆熔离型铜镍硫化物矿床,含矿超基性-基性杂岩体呈椭圆状近东西向展布,西段隐伏于金水口群之下,剖面上表现为北部南倾,南部北倾。岩体基本由辉石岩、橄榄岩和辉长岩组成,含矿岩性主要为橄榄岩和辉石岩;矿石矿物主要为黄铜矿、镍黄铁矿、磁铁矿、磁黄铁矿等,矿体多呈厚大的似层状,一般上部以浸染状、团块状矿石为主,中下部及底部多为稠密浸染状、致密块状矿石,少数矿体呈透镜状、漏斗状位于岩体上部,呈上悬矿体或条带状分布于岩体中。含矿超基性岩体的围岩主要是石英岩,北侧被后期的花岗岩截断。

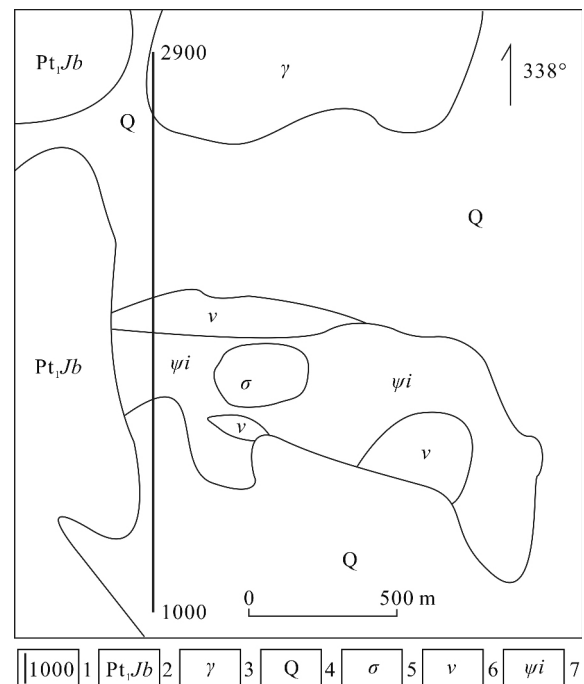


图1 剖面布置及工作区地质简图

Fig. 1 Sketch map showing geology and deployment of profiles in the survey area

1 - 试验剖面及其桩号; 2 - 古元古界金水口群白沙河岩组; 3 - 花岗岩; 4 - 第四系; 5 - 橄榄岩; 6 - 辉长岩; 7 - 辉石岩  
1 - testing profile and stations; 2 - Baishahe Formation of Palaeoproterozoic Jinshuikou group; 3 - granite; 4 - Quaternary; 5 - peridotite; 6 - gabbro; 7 - pyroxenite

夏日哈木镍矿区地质构造背景复杂,矿产类型除与超基性岩有关的镍矿外,还有与中酸性岩有关的铁、铜、铅、锌矿产。

通过在矿区进行的物性采集测定结果资料(表1)和其他项目同期进行的物性工作(吕琴音等,2015;郭友钊等,2016)可以看出,含矿岩体与围岩具有明显的物性差异,具备开展重、磁、电工作的前

提。因此,选择高精度重力、磁测、大功率激电、可控源音频大地电磁测深、音频大地电磁测深等矿产地质调查工作中经常采用的地球物理勘探方法,开展方法有效性试验。

表 1 测区岩(矿)石物性测定统计表  
Table 1 Statisticals of physical properties of rocks from the survey area

岩石名称	密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	磁化率( $10^{-3}\text{SI}$ )	电阻率( $\Omega\cdot\text{m}$ )	极化率(%)
矿体	3.15	4~23.9	50~120	5~12
石英岩	2.8	0.2~0.43	200~300	1~1.5
辉橄岩	2.91	17.69~36.16	60~130	0.7~14.4
辉长岩	2.7	0.24~0.5	300~350	2~3
花岗岩	2.59	0.01~0.07	335~1205	0.01~0.93

2.1 高精度重力有效性试验

2.1.1 试验方法及精度

高精度重力有效性试验采用 CG-5 型高精度相对重力仪进行数据采集。试验采用的点距为 10m,剖面长度为 1900m。为保证试验数据的精度,采用了双程往返观测法,试验工作的重力观测均方误差为  $\pm 0.016 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 。

近区地形改正采用两种方法进行了对比,一是采用西安地质调查中心研发的近区地形改正系统,按 16 方位 10 环进行,经质量检查,近区地形改正均方误差为  $\pm 9.8 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$ ,最大误差为  $25 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$ ;二是采用矿区最新测得的 1:2000 高程数据进行。

中区地形改正分别采用从国家测绘总局购买的 1:5 万 DEM 高程数据、卫星高程数据和 1:2000 高程数据进行。由于 1:2000 高程数据质量最高,改正效果最好,因此最终采用 1:2000 高程数据统一进行了近中区地改。由于 1:2000 高程数据范围有限,中区地形改正的范围为 200m。

2.1.2 试验效果分析

高精度重力在试验剖面取得的布格重力异常如图 2a 所示。从图上可见,布格重力异常总体与地形呈正相关关系,但在矿体上方地形起伏不大的地段有一明显的重力高异常,这说明矿体能引起明显的重力高异常,但由于山区地形引起的异常压制了含矿岩体引起的异常,使得含矿岩体的重力异常并不突出。

为了能更明显地反映重力异常与矿体的关系,我们进行了剩余异常的求取,方法如下:首先,将 2000m 以下的地层认为是背景场,通过正常场计算从布格重力异常中减掉,对从地表至地下 2000m 范围内的地层,利用测定的围岩密度结合地形资料建立模型进行正演计算,得到的结果是不含矿地层引

起的重力异常,再将这个计算结果从已减掉背景场的重力异常中减掉,剩下的残余重力异常基本上是含矿岩体引起的重力异常(图 2b)。

从计算结果看,剩余重力异常与矿体存在明显的对应关系,矿体大约引起了  $2.2 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  的重力异常,异常峰值区对应矿体富集区,依据物性资料综合分析,剩余重力异常主要由矿体引起,其次为超基性岩体。

从试验结果看,含矿岩体引起了明显的剩余重力异常,这是因为含矿岩体与围岩具有  $0.3 \sim 0.5 \text{g}/\text{cm}^3$  的密度差,同时可见,剩余重力异常的高值区正对应矿体富集区。可见,在具备密度差异的前提下,大比例尺高精度重力工作在区分岩体边界方面是有效的,对具有一定规模的矿体,甚至可直接区分矿体与围岩的边界。而不含矿的辉长岩与围岩的密度差相对较小,引起的重力异常则相对较弱。

根据以上试验结果,在实际工作中,可结合物性参数,通过一定的正、反演工作,大致能推断超基性岩体的含矿性。

2.2 高精度磁测有效性试验

2.2.1 试验方法及精度

磁测工作采用重庆奔腾产 WCZ-1 型质子磁力仪按总场测量方式进行数据采集。试验采用的点距为 10m,长度为 1900m。试验工作的测量均方误差  $\pm 3.8 \text{nT}$ ,最大误差  $6.3 \text{nT}$ 。

2.2.2 试验效果分析

高精度磁测在试验剖面取得的  $\Delta T$  异常曲线(未化极)(图 3)。由于高精度磁测试验剖面本身就布置在夏日哈木含矿超基性岩体上,因此,磁测曲线的形态总体是高背景下的异常形态。从图上可以看出,磁异常只是在含矿岩体埋深较浅部位有明显反映,大约引起了  $400 \text{nT}$  左右的异常变化,埋深较大的部位磁异常特征与围岩没有太大差异,呈现平缓

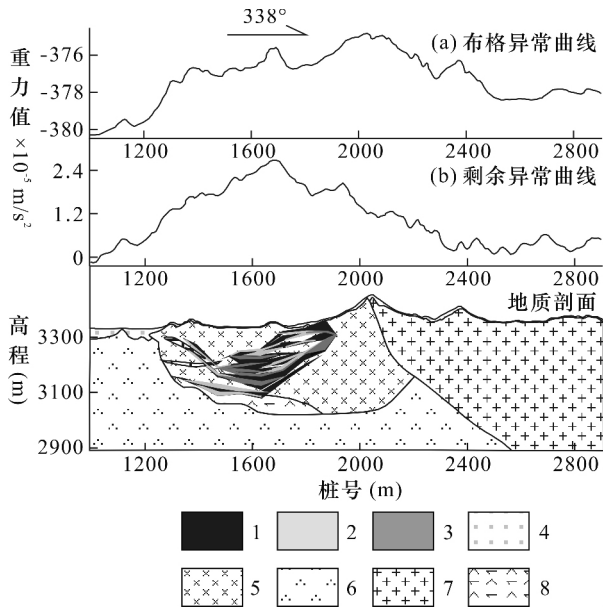


图2 高精度重力试验成果

Fig. 2 High-precision gravity survey results

1 - 镍矿体; 2 - 低镍矿体; 3 - 铜镍矿体; 4 - 第四系; 5 - 辉长岩; 6 - 石英岩; 7 - 花岗岩; 8 - 辉橄岩  
1 - nickel orebody; 2 - low-nickel orebody; 3 - copper-nickel orebody; 4 - Quaternary; 5 - gabbro; 6 - quartzite; 7 - granite; 8 - augite peridotite

磁异常特征 这与磁场衰减较快 磁异常主要反映的是浅部异常的特性有很大关系。

结合以往高精度磁测工作成果可以看出,高精度磁测在大范围内寻找基性-超基性岩体等是非常有效的,这是因为一般基性-超基性岩体与地层围岩相比,都具有更强的磁性,能引起较明显的磁异常。以夏日哈木为例,辉长岩的磁性是其围岩片麻岩的2~3倍,而含矿辉橄岩的磁性则是其的十几倍至数十倍,物性差异非常明显。而在岩体内部,含矿部位的磁性明显强于不含矿部位,因此,能引起较明显的磁异常,对同一矿体,含矿部位磁异常强于不含矿部位,含矿部位埋深越浅异常越明显。

### 2.3 激电中梯有效性试验

#### 2.3.1 试验方法及精度

激电中梯试验工作采用加拿大凤凰地球物理公司的TXU-30大功率发射系统,发射功率为30kW,采用重庆奔腾产的WDJS-2型数字直流激电接收机进行接收。试验剖面长度900m,点距10m,工作时选择的参数为AB=1800m, MN=40m,供电周期为32s,断电延时为200ms。试验工作的视电阻率均方相对误差为2.7%,视极化率均方相对误差为2.1%。

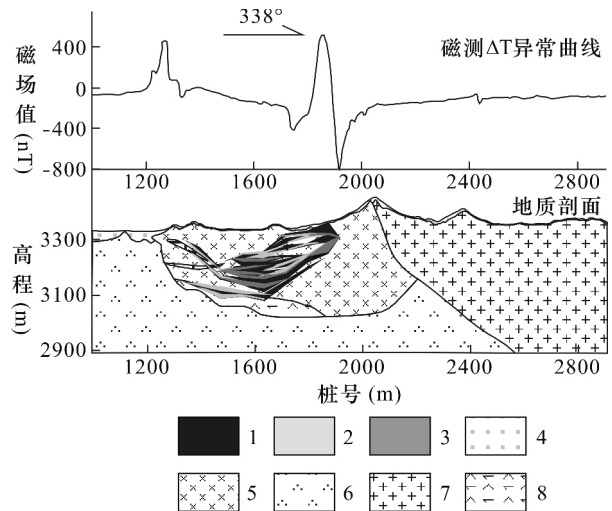


图3 高精度磁测试验成果

Fig. 3 High-precision magnetic survey results

1 - 镍矿体; 2 - 低镍矿体; 3 - 铜镍矿体; 4 - 第四系; 5 - 辉长岩; 6 - 石英岩; 7 - 花岗岩; 8 - 辉橄岩  
1 - nickel orebody; 2 - low-nickel orebody; 3 - copper-nickel orebody; 4 - Quaternary; 5 - gabbro; 6 - quartzite; 7 - granite; 8 - augite peridotite

#### 2.3.2 试验效果分析

激电中梯在试验剖面取得的成果见图4。由图可见,在含矿岩体部位,极化率明显升高,基本都在6%~10%之间,随着矿体埋设变浅,极化率进一步增加,最高值达11%左右,而电阻率则明显降低,含矿岩体埋深较浅处电阻率<50Ω·m,且极化率和电阻率的变化与含矿岩体部位吻合得非常好。

由于夏日哈木镍矿区的含矿辉橄岩极化率为5%~12%,电阻率为50Ω·m~120Ω·m,而围岩的极化率一般不超过3%,电阻率一般大于300Ω·m,矿体与围岩间存在明显的电性差异,因此,矿体能引起明显的极化率和电阻率异常。同时,通过试验可知,只要处理好供电电极,该地区不存在接地条件不好的问题。从以上试验结果可以看出,激电中梯工作针对该地区的多金属矿(尤其是硫化物矿)是一种非常有效的勘探手段。

结合试验结果,分析以往该地区激电工作多数效果不佳的原因,归纳一下有以下几个方面:

一是发射功率不够,不能获得足够的信号。分析以往激电工作的资料可以发现,由于地形条件差,施工单位往往采用小功率的发射机(一般都是5kW,甚至是2kW)。但青海祁漫塔格成矿带地处高海拔地区,空气稀薄,氧含量低,而目前国内装备的激电测量仪器所配套的汽(柴)油发电机都没有针对高原环境进行过特别改造,因此,对超过1000

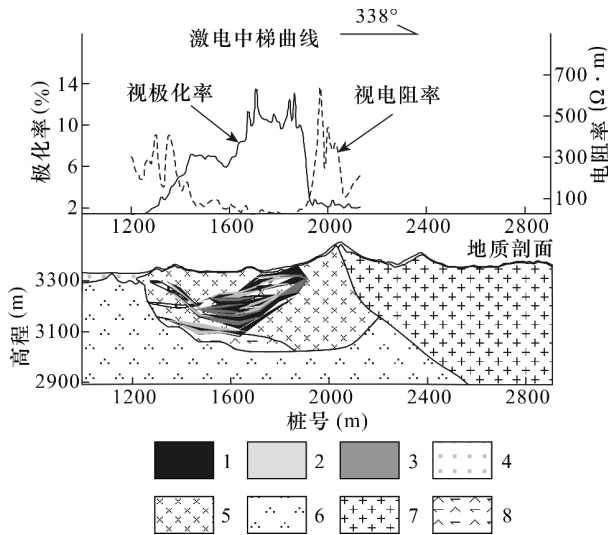


图 4 激电中梯试验成果

Fig. 4 IP Intermediate gradient survey results

1 - 镍矿体; 2 - 低镍矿体; 3 - 铜镍矿体; 4 - 第四系; 5 - 辉长岩; 6 - 石英岩; 7 - 花岗岩; 8 - 辉橄岩  
1 - nickel ore body; 2 - low nickel ore body; 3 - copper - nickel orebody; 4 - Quaternary; 5 - gabbro; 6 - quartzite; 7 - granite; 8 - augite peridotite

米的海拔高度要求发电机降功率使用,以避免发电机过热。根据有关发电机输出功率参数资料(表 2),在海拔超过 1000 米时,发电机的实际输出功率应乘以修正系数进行修正。

表 2 发电机不同海拔高度修正系数表  
Table 2 Correction factors of the generator at different altitudes

海拔高度 (m)	修正系数 (%)
1500	0.97
2000	0.94
2500	0.91
3000	0.85
3500	0.82

二是发射和接收电极的接地问题处理的不好。祁漫塔格地区大部分地区地表干旱,为风成砂等覆盖,接地条件较差,如果不认真处理,改善接地条件,很难取得好的效果。

三是供电周期一般选的太短。从供电周期试验(图 5)可以看出,随着充电时间的延长,充电饱和度增大,含硫化物矿体的极化率明显增高,而围岩极化率的增加程度则有限,因此,采用长的供电周期,可明显地突出异常。但分析以往的资料发现,为了提高工作效率,往往采用的都是 4s 或 8s 的供电周期,因此异常往往不明显,对硫化物含量较地的矿(化)

体,效果更差。

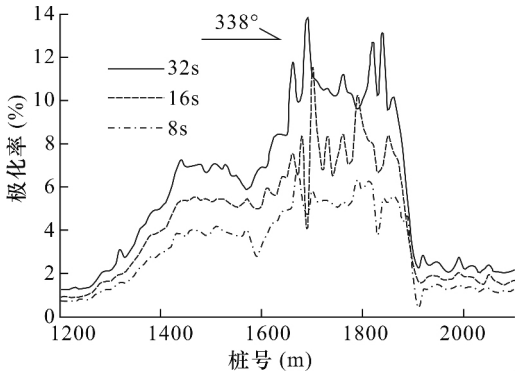


图 5 极化率与供电周期的关系

Fig. 5 Relationship between polarization and power supply period

综合以上试验结果及分析,我们认为,在青海祁漫塔格地区,针对金属硫化物矿物,激电中梯仍是有效的工作手段,只是针对这一特殊地区,要采取一些针对性的措施:第一,要采用大功率的发射装置,一般不应低于 10kW,对一些埋深较大的矿体,还应加大;大功率激电方法可以输出较强电流,压制各种干扰信号,提高信噪比,在大极距下可以保证观测精度,因而具有相当大的勘探深度(陈伟军等 2016)。第二,要采取措施改善接地条件。第三,供电周期要长,一般不应小于 16s,最好通过认真细致的试验确定,因为对一些极化率异常较弱的地区,延长供电周期,可以有效地放大异常区信号;另外接收极距不宜过大,在保证一次场稳定可靠的情况下,应尽量选用小的接收极距,这样可以提高异常的分辨率。

## 2.4 可控源音频大地电磁测深有效性试验

### 2.4.1 试验方法及精度

可控源音频大地电磁测深试验工作采用加拿大凤凰地球物理公司产的 V8 网络化多功能电法仪进行,试验剖面长度为 1100m,点距为 10m,收发距为 10km,发射偶极距 AB 为 2km。试验工作的视电阻率均方相对误差  $m\phi = 3.32\%$ ,相位均方相对误差  $m\phi = 4.46\%$ 。

### 2.4.2 试验效果分析

从电性结构上可以看出(图 6),在含矿岩体部位,即测线 1320~1900 测点下方出现了较为明显的低阻异常,并且在 1650~1880 测点下方的低阻异常变深,此处含矿岩体较厚且埋藏浅。同时在测线 1320~1440 测点下方,高程在 3250~3050m 区域也出现了低阻异常,该区域存在部分的低阻含矿岩体。

从试验结果看,可控源音频大地电磁测深针对夏日哈木这类矿体效果是明显的,是一种可供选择的勘探方法。

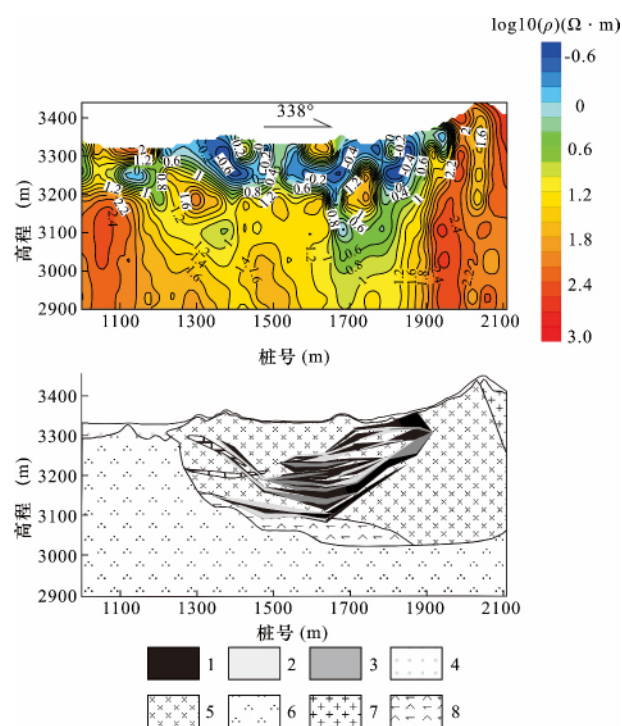


图6 可控源电磁测深试验成果

Fig. 6 CSAMT survey results

1 - 镍矿体; 2 - 低镍矿体; 3 - 铜镍矿体; 4 - 第四系; 5 - 辉长岩; 6 - 石英岩; 7 - 花岗岩; 8 - 辉橄岩

1 - nickel ore body; 2 - low nickel ore body; 3 - copper - nickel ore body; 4 - Quaternary; 5 - gabbro; 6 - quartzite; 7 - granite; 8 - augite peridotite

CSAMT 具有探测深度大、分辨能力较强、观测效率高,兼有测深和剖面研究双重特点,一般用于确定矿化系统的深部宏观几何形态和产状变化。但是,CSAMT 也还存在一些缺点,如静态效应和近场效应等。从图 5 中还可可见,由于受近场效应的影响,深部反映的效果并不理想。

应用可控源大地电磁测深方法,在工作中应注意以下问题:一是要处理好发射极的接地问题,尽量减小接地电阻,以提高供电电流;二是要尽量选择大功率发电机供电,以增加信号强度,压制干扰;三是发射距的问题,在可能的情况下应尽量加大发射距,以尽最大可能地消除近场效应的影响。

但是受发射功率的限制,发射距不可能无限加大,同时,受地质条件限制,发射距太大,也难以满足发射极与目标体之间为均匀介质的前提条件,因此,对埋深较大的矿体,该方法还是有局限性的。

## 2.5 音频大地电磁测深有效性试验

### 2.5.1 试验方法及精度

音频大地电磁测深试验采用 V5 - 2000 大地电磁测深仪按四分量观测方式进行数据采集,点距为 40m,剖面长度 960m。布极时 EX、HX 方向要求沿正北方向布设, EY、HY 要求沿正东西布设,布极方位误差不应超过 1°,所有试验点保持 EX 方向一致。电极采用标准“+”字形布设,电极线布设时全部压实。水平磁棒方位经仪器实测,方位误差小于 1°,磁棒埋入地下不小于 0.3m,埋设前用水平尺量水平,保持水平倾斜 < 1.5°。

所使用的电极在试验前浸泡湿润,电极电位差不大于 1mV;不论何种地形,均保证接地良好,接地电阻不大于 2kΩ;同一方向的两电极相对高差尽可能控制在极距长度的 10% 以内。

音频大地电磁测量试验主要采集 10000Hz 到 0.1Hz 的电磁信号,观测时间和有效叠加次数要根据实际情况确定,最低频点的叠加次数不少于三次。试验工作的视电阻率、相位的均方相对误差为:  $m_{\phi xy} = 3.5\%$ ,  $m_{\rho yx} = 2.41\%$ ;  $m_{\phi xy} = 2.98\%$ ,  $m_{\rho yx} = 1.96\%$ 。

### 2.5.2 试验效果分析

音频大地电磁测深试验结果如图 7 所示,在含矿岩体所在位置,剖面出现了明显的低阻异常区,异常与含矿岩体总体上对应良好,异常反应出了含矿岩体的大体位置与形态,但在细节上仍有出入,在测线 1350 ~ 1480 测点之间,含矿岩体埋藏较深且厚度较薄,而试验结果却在浅部出现了低阻异常。

由试验结果可见,音频大地电磁测深工作是有效的,由于采用天然场源电磁测深方法工作时,对地形条件的要求相对要宽松一些,因此,对类似夏日哈木矿区这样地形复杂地区,在探测目标基本定性的前提下,只要外围干扰不太大,音频大地电磁测深方法是较好的深部探测方法。

之所以说在探测目标基本定性的前提下,是因为电磁测深方法只能获取目标地质体的视电阻率,这是该方法的不足之处,因此,需要其它方法配合定性了解目标地质体的性质。另外,天然场源测量由于信号弱,抗干扰能力稍差一些,尤其是震动干扰是无法压制的,因此,在野外施工中要注意避开强电磁干扰区和震动干扰。

## 2.6 有效的方法技术组合

从夏日哈木镍矿区物性采集测定结果及前人在青海祁漫塔进行的物性工作资料可以看出,祁漫塔



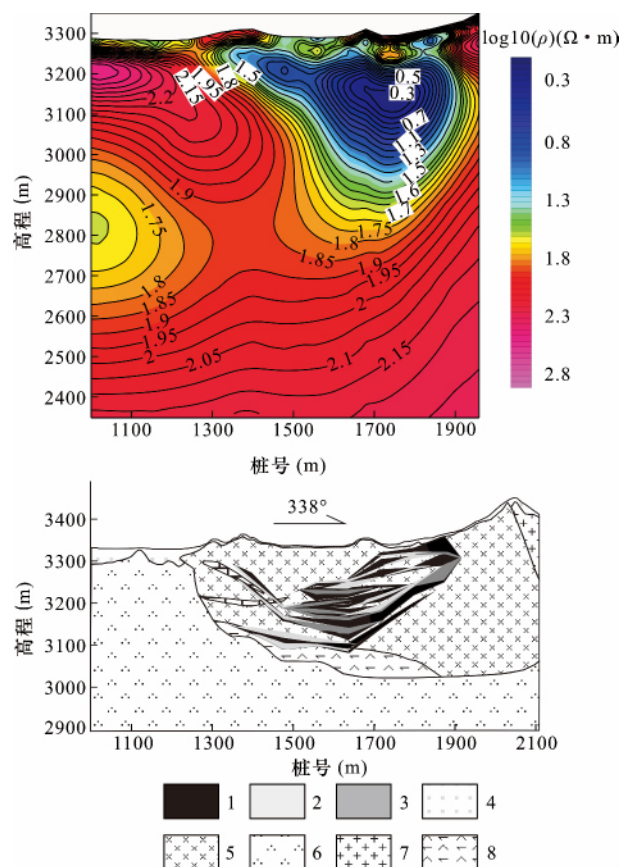


图7 天然场源电磁测深试验成果

Fig. 7 Natural field source electromagnetic sounding results

1 - 镍矿体; 2 - 低镍矿体; 3 - 铜镍矿体; 4 - 第四系; 5 - 辉长岩; 6 - 石英岩; 7 - 花岗岩; 8 - 辉橄岩

1 - nickel ore body; 2 - low nickel ore body; 3 - copper - nickel ore body; 4 - Quaternary; 5 - gabbro; 6 - quartzite; 7 - granite; 8 - augite peridotite

格地区一般矿体与围岩均有明显的密度、磁性及电性差异,因此具备开展重、磁、电等各种地球物理勘探的前提。

通过前期工作已经获取了找矿重点区信息,需要利用地球物理勘探方法确定重点区地下地质体的属性,对成矿前景进行评价,圈定重点成矿区的空间位置,为钻探验证提供依据时,建议应首先开展1:2千~1:1万比例尺的高精度磁测和激电中梯工作,细分异常,如工作区内有高精度的地形DEM数据可有效进行地形改正和剩余异常求取,也可考虑开展高精度重力工作,从而可以从磁化率、密度、极化率及电阻率等多方面综合了解地下地质体的信息。在此基础上,开展激电测深和电磁测深,以确定地下地质体的深度,进而通过综合研究,对重点区成

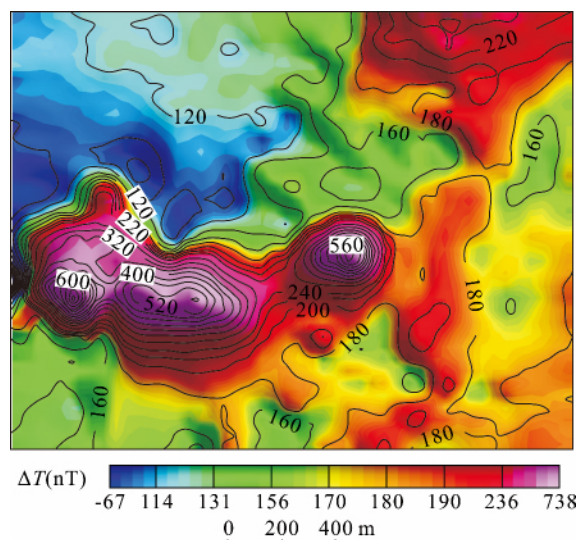
矿前景进行评价。

### 3 方法技术应用实例

为了进一步检验以上试验取得的成果,我们在夏日哈木镍矿外围选择了一处前人工作发现的磁异常进行应用示范。示范工作取得了较好的效果,我们将此区域命名为“红柳河谷综合物探异常区”,并进行了钻探验证。以下就该异常区的应用示范成果及钻探验证结果进行说明,关于该异常的地质意义及成矿类型等本文不做讨论。

进行应用示范工作的磁异常位于夏日哈木镍矿东侧约7km处的苏海图河地区,与夏日哈木镍矿处于同一构造带上,地质背景也类似。异常区为晚更新系洪冲积物覆盖,东、西两侧出露古元古界黑云斜长片麻岩,北侧出露晚三叠系正长花岗岩。

该磁异常见图8,异常变化范围在 $-65 \sim 735 \text{ nT}$ 之间,属中等强度磁异常。高值异常呈近东西向至北东向弧形展布,高值异常变化剧烈,梯级带较陡,低值区异常平缓。

图8 地磁 $\Delta T$ 化极异常Fig. 8  $\Delta T$  reduction to the pole magnetic anomalies

该磁异常上的应用示范工作主要采用了激电中梯、激电测深和音频大地电磁测深等方法。

#### 3.1 激电中梯测量

##### 3.1.1 方法技术及精度

激电中梯测量工作采用的仪器为:发射使用加拿大凤凰地球物理公司的TXU-30,数据采集使用重庆奔腾WDJS-2A数字直流接收机。工作装置测量参数为:AB=3290m,MN=80m,供电周期为T

$= 16\text{s}$ , 采样延时  $t_D = 200\text{ms}$ , 采样宽度  $t_1 = 40\text{ms}$ 。采用  $100\text{m} \times 40\text{m}$  的基本点线距, 在异常区加密为  $100\text{m} \times 20\text{m}$ , 局部地段加密了测线, 旁侧线距离小于  $AB/5$ 。检查统计激电中梯测量工作视电阻率观测均方相对误差为  $2.05\%$ , 视极化率观测均方相对误差为  $4.20\%$ 。

### 3.1.2 激电中梯测量成果

激电中梯测量获得的视极化率异常见图 9。总体来看, 视极化率南北部基本在  $2\% \sim 3\%$  之间, 而中部为一近东西向视极化率高异常带。该视极化率异常带整体背景较高, 约在  $3.5\% \sim 4.5\%$ , 主要异常区视极化率在  $5\%$  以上, 最高值达到了  $7\%$  以上。

激电中梯测量获得的视电阻率异常见图 10。从图中可见, 区内南部视电阻率基本在  $200\Omega \cdot \text{m} \sim 300\Omega \cdot \text{m}$  间, 中部有一条东西向的中阻异常带, 视电阻率值在  $350\Omega \cdot \text{m} \sim 450\Omega \cdot \text{m}$  间, 其平面位置在视极化率异常的南侧; 视极化率异常区的视电阻率总体呈低阻, 视电阻率值在  $150\Omega \cdot \text{m} \sim 250\Omega \cdot \text{m}$  间 (局部北东向的中阻异常据现场调查是由一条北东向的“V”型深沟造成的)。

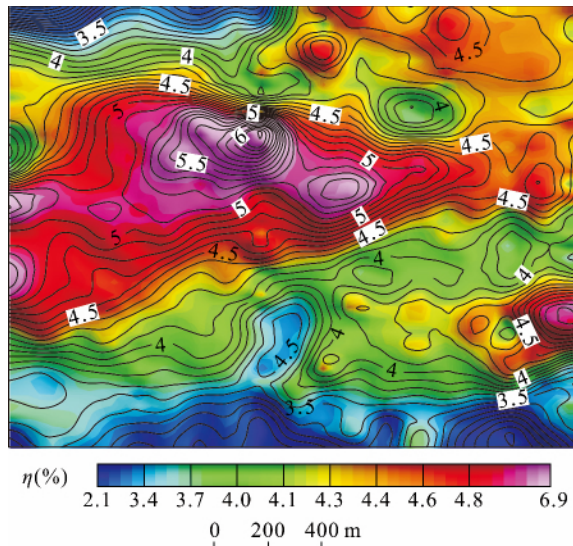


图 9 视极化率异常

Fig. 9 Apparent polarizability anomalies

视电阻率异常受地形的影响较大, 但总体幅值变化不是太大, 与视极化率异常呈镜像对应关系。

分析激电中梯测量成果, 可见引起异常的地质体具有低阻高极化率特征, 但激电异常与磁异常不对应, 可见激电异常与磁异常不是同源异常。

### 3.2 激电对称四极测深

为了了解激电异常深部极化率及电阻率特征,

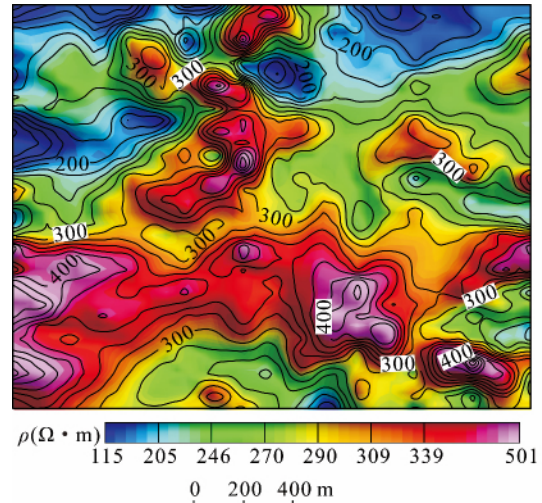


图 10 视电阻率异常

Fig. 10 Apparent resistivity anomalies

我们在穿过主激电异常区布置了三条对称四极激电测深剖面, 完成了 20 个激电对称四极测深点。

#### 3.2.1 方法技术及精度

激电对称四极测深工作采用的仪器及装置参数与激电中梯测量相同, 检查统计视电阻率观测均方相对误差为  $3.76\%$ , 视极化率观测均方相对误差为  $4.58\%$ 。

#### 3.2.2 激电对称四极测深成果

所有激电对称四极测深点的一维反演结果都大同小异, 我们在此仅选取最终钻探验证位置的测深点一维反演结果加以说明 (图 11)。从图中可见, 在  $350 \sim 500\text{m}$  间出现了高极化率低电阻率特征, 极化率大约在  $3.5\%$  左右, 电阻率约为  $180\Omega \cdot \text{m}$ 。反映在这一深度有明显的低阻高极化率异常带存在。

### 3.3 音频大地电磁测深测量

为了进一步确定极化率异常区的深部特征, 采用音频大地电磁测深法对激电中梯极化率异常区进行了数条剖面的追索。

#### 3.3.1 方法技术及精度

音频大地电磁测深测量采用的仪器及方法与前述试验中采用的仪器及方法技术相同, 在此不再赘述。测深点在极化率异常区采用  $100\text{m} \times 40\text{m}$  网度进行, 在主异常区加密为  $50\text{m} \times 40\text{m}$ 。检查统计视电阻率、阻抗相位的均方相对误差为:  $M_{\rho xy} = 3.12\%$ ,  $m_{\rho yx} = 4.25\%$ ;  $m_{\phi xy} = 3.76\%$ ,  $m_{\phi yx} = 2.97\%$ 。

#### 3.3.2 音频大地电磁测深测量成果

从测量结果看, 位于激电极化率异常中心部位



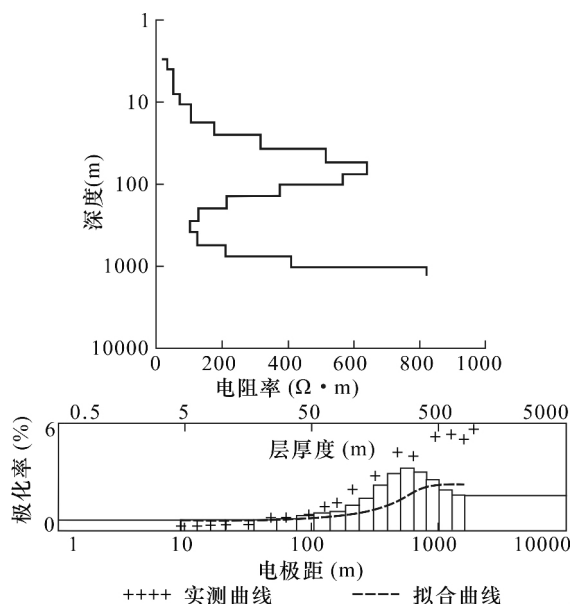


图 11 激电测深一维反演结果

Fig. 11 Inversion of IP sounding data

的多条音频大地电磁测深剖面在深度 300 ~ 600m 间存在低阻带,低阻带总体向南倾,在深度 800 ~ 900m 左右视电阻率明显升高(不同剖面深度有所不同)。低阻带在极化率异常最强的区域表现明显,向东西两侧随极化率异常的减弱低阻带也逐渐减弱至消失。我们在此仅以穿过验证钻孔位置的一条剖面加以说明。

从该条剖面一维反演结果(图 12)可见,在深度约 350 ~ 600m 间存在一连续低阻带,深度约 450 ~ 550m 间异常最为明显,在深度 850m 以上,电阻率均偏低,850m 以下电阻率明显增高。据此推断,在深度 450 ~ 550m 之间应存在低阻地质体,而在深度约 850m 处应存在一个物性界面。

#### 3.4 钻探验证结果

综合以上各方法工作取得的异常,结合地质背景及对该地区成矿条件的认识,我们提请有关单位对该综合异常进行了钻探验证。验证钻孔位置位于极化率异常高值处,设计孔深 900m,实际终孔深度 907m。钻探验证结果如下: 385.10 ~ 487.44m 见黄铁矿化砂卡岩,其中在 405.60 ~ 409.94m 见 4.34m 稠密浸染状至致密块状黄铁矿层,在 476.05 ~ 487.44m 间见三层累计厚度为 5.2m 的稠密浸染状黄铁矿层;在 500m 后见少量黄铜矿、辉钼矿矿层; 487.44 ~ 820.38m 为蚀变去母片岩及蚀变石英片岩等,细脉状黄铁矿较发育; 820.38 ~ 837.42m 为弱黄铁矿化蚀变闪长岩,偶有黄铜矿化; 837.42m 以下基

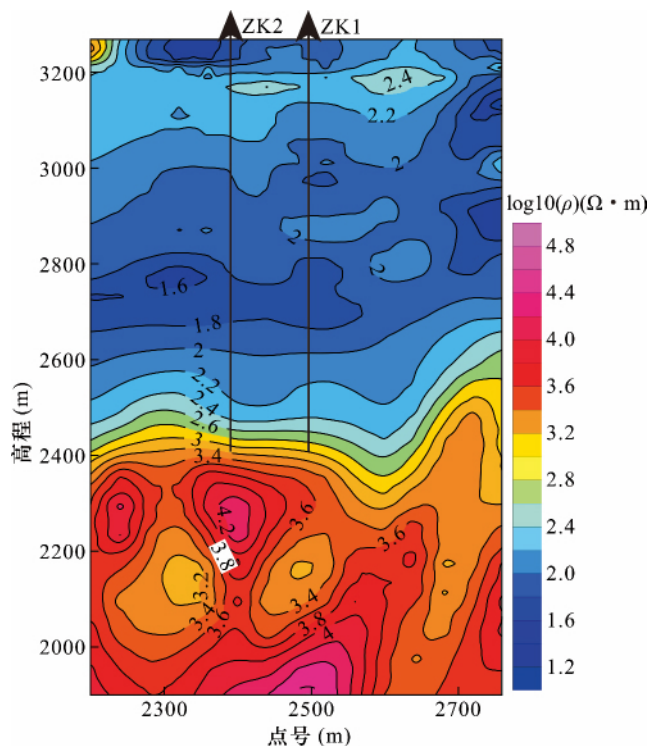


图 12 音频大地电磁测深异常特征

Fig. 12 AMT anomalies

本为金水口群老地层。

岩心分析结果: 第一层黄铁矿中铅品位为 0.1% ~ 0.25%, 锌品位为 0.5% ~ 1.5%; 第二层稠密浸染状黄铁矿中铜品位为 0.1% ~ 0.6%, 铅品位为 0.05% ~ 0.3%, 锌品位为 0.5% ~ 3.2%。第一层的铅、第二层的铜、铅、锌均达到工业品位。

#### 3.5 应用示范工作效果分析

从钻探验证结果看,激电中梯测量及激电对称四极测深方法和音频大地电磁测深方法在该地区无疑是有效的: 在前人获得的磁异常的基础上,通过激电中梯测量获得了极化率和电阻率异常;通过激电对称四极测深确定了低阻高极化地质体的埋深;通过音频大地电磁测深不但进一步印证了激电对称四极测深结果,还在深部发现了一个地质界面。同时,钻探验证结果也说明前期对异常的定量解释基本是准确的。

另外,从钻遇的大量黄铁矿(脉)分析,该区域存在过大量的热液活动,因此该区域应该存在寻找有工业价值的、与中酸性岩有关的矿物的前景,有进一步工作的价值。

## 4 讨论

通过方法技术有效性试验及应用示范工作,认

为要想取得实际效果,必须解决工作中的一些实际问题,以克服地形、地貌、外部施工环境等的影响,下面对上述几种在矿产地质调查工作中经常采用的地球物理勘探方法,在青海祁漫塔格成矿带开展工作时应注意的问题进行几点讨论。

#### 4.1 高精度磁测

由于受地形、剩磁方向等多种因素影响,地面高精度磁测所获得的地磁场形态变得相当复杂,尤其是在山区开展高精度磁测工作,如果山体本身就具有一定的磁性,则地形对高精度磁测的影响更大。因此,在异常分析解释时一定要考虑这些因素,这一点往往是容易被忽略的。

#### 4.2 高精度重力

影响高精度重力工作有效性的最大原因是地形改正工作,因此,如果在山区开展高精度重力工作,一定要解决好地形改正问题,具体到青海祁漫塔格成矿带,该问题的实质就是如何获取高精度的地形 DEM 数据。通过试验对比研究,我们认为,国家测绘局提供的 1:5 万 DEM 数据和一般的卫星 DEM 数据均不能满足要求,最好的解决办法是实测大比例尺地形 DEM 数据。如果暂时做不到直接实测大比例尺地形 DEM 数据,那么也可采用高分辨率的卫星 DEM 数据,在实地校正后用于地形改正。

另外,在山区开展高精度重力工作,数据的后期处理及异常提取也很重要,切不可简单地处理一下了事,这会出现问题,对解释工作形成误导。

#### 4.3 激电测量

首先,要选择大功率激电仪器,建议输出功率不应小于 10kW,对于埋深较深的目标体进行工作时,由于要增大供电电极距,因此输出功率还应加大,供电周期应通过试验选择,一般不应小于 16s;其次,施工前应做好供电电极的接地处理工作,可通过挖坑浇水、铺埋铜(铝)箔等办法解决;最后,在分析激电测量数据时要注意,电阻率测量结果受地形影响较大,如一般测线如果穿越了冲沟等地形,则往往形成高阻,因此在结合具体情况分析使用,切不可直接用测量结果给出结论。

#### 4.4 可控音频大地电磁测深

一是要处理好发射极的接地问题,尽量减小接地电阻,以提高供电电流;二是要尽量选择大功率发电机供电,以增加信号强度,压制干扰;三是发射距的问题,在可能的情况下应尽量加大发射距,以尽可能消除近场效应的影响;四是工作布置前应尽量了解工作区地质构造情况,选择地质构造简单

的方向布置发射源;五是在数据处理时,应尽可能多地使用约束条件,多采用几种方法进行处理,尽可能使处理解释结果符合实际情况。

#### 4.5 音频大地电磁测深

主要应注意避开干扰,正确埋设接收磁棒。另外,部署该项工作前应先了解目标地质体的深度,避开死频区,如果无法避开,要考虑建立人工场补充。最后,也是要注意数据处理和解释方面的问题。

### 5 结论

通过对青海祁漫塔格成矿带具有代表性地形地貌特征的夏日哈木镍矿区及其外围区域开展矿产地质调查工作中常用的地球物理勘探方法的有效性试验及示范工作,证明在解决好施工过程中的一些技术问题后,这些方法在青海祁漫塔格成矿带的地质矿产调查工作中都是有效的,尤其是激电测量方法,通过大范围的调查发现,青海祁漫塔格成矿带虽然大部分区域为沙漠、戈壁覆盖,但其下部并不像看上去的那么干旱,采取一些措施后,完全可以改善接地条件,取得好的测量结果。这一结论纠正了前人对该地区不适合进行激电测量工作的错误认识,对该地区开展矿产地质调查工作具有重要意义。

本文对方法有效性的认识及工作过程中应注意问题的总结,可作为在青海祁漫塔格成矿带开展地质矿产调查工作时地球物理勘探方法选择的参考,建议在具有物性前提与地质成矿条件区域有选择地采用重力、磁测、激电等方法组合,通过寻找重磁综合异常,针对性开展电法或电磁法测深工作,以指导工程验证与找矿,达到寻找隐伏矿与深部找矿目的。

#### [References]

- Bai Guo-long, He Shu-yue, Zhao Yong, Zhang Yong, Zhang Peng. 2015. The application effects of CSAMT in Qimantage blind ore exploration——Take Kaerqueka for example [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 37 ( 5 ): 606 - 609 ( in Chinese with English abstract )
- Chen Wei-jun, Hong Wan-hua, Hao Qing-qing, Chu Shao-xiong, Xing Bao-shan. 2016. Application of high - power induced polarization and continuous conductivity sounding for prospecting in the Chifeng - Chaoyang gold concentration region [J]. Geology and Exploration 52 ( 1 ): 0152 - 0158 ( in Chinese with English abstract )
- Du Wei, Ling Jin-Lan, Zhou Wei. 2014. Geological characteristics and genesis of Xiarihamu nickel deposit in east Kunlun [J]. Mineral Deposits 33 ( 4 ): 713 - 726 ( in Chinese with English abstract )
- Fan Chang-an, Yan Yong-bang, Wang Yi-qing. 2013. The application effect of precision magnetic survey in Qimantage area [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 35 ( 1 ): 28 - 33 ( in Chinese with English abstract )

- Guo You-zhao ,Guo Xin-wei ,Li Lei ,Wang Xing-chun. 2016. The density characteristics of rocks from Xiarihamu copper nickel sulfide deposit and problem of gravity exploration deployment in east Kunlun Qinghai Province [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics ,13 ( 1 ) : 1 - 6 ( in Chinese with English abstract )
- Guo You-zhao ,Guo Xin-wei ,Wang Xing-chun. 2015. A preliminary study of the magnetic parameters  $Q$  used to recover the ore - forming process of the Xiarihamu Cu - Ni sulfide deposit in east Kunlun , Qinghai Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration ,39 ( 6 ) : 1278 - 1283 ( in Chinese with English abstract )
- He Shu-yue ,Chen Hai-fu ,Tian San-chun ,Zhang Ai-kui ,Guo Gui-lan. 2010. New progress of prospecting and exploration in Qimantag area , Qinghai Province [J]. Mineral Deposits ,29 ( 1 ) : 657 - 658 ( in Chinese )
- He Shu-Yue ,Shu Shu-lan ,Liu Yong-le. 2013. Summary of effective prospecting methods in Qimantag area , Qinghai Province [J]. Mineral Deposits ,32 ( 1 ) : 187 - 194 ( in Chinese with English abstract )
- Huang Li-jun ,Liu Rui-de ,Lu gui-fu. 2004. Electrical aspects of looking for concealed metallic deposit predict positioning [J]. Geophysical and Geochemical Exploration ,28 ( 1 ) : 277 - 282 ( in Chinese )
- Li Bai-xiang ,Teng Han-ren ,Xin Chen-qi. 1999. Interpretation to the gravity ,magnetic and electronic anomaly of Heishan Cu - Ni deposit [J]. Acta Geologica Gansu ,8 ( 2 ) : 65 - 71 ( in Chinese )
- Li Dong-sheng ,Zhang Wen-quan ,Tian Cheng-sheng ,Yan Chen ,Wang Li-jun ,Jing Xian-yang. 2013. Discussion on the metallogenic characteristics and ore - prospecting methods of Qimantag region ,Qinghai Province [J]. Northwestern Geology ,46 ( 4 ) : 131 - 141 ( in Chinese with English abstract )
- Li Tian-hong ,Luo Xian-rong ,Peng Qiao-liang. 2012. Geological - geo-electrochemical - geophysical multifactor information ore prognosis in the depth and on the edge of No. I mining area of the Jinchuan copper - nickel sulfide ore deposit ,Gansu Province [J]. Geological Bulletin of China ,31 ( 7 ) : 1192 - 1200 ( in Chinese )
- Lü Qin-yin ,Jing Rong-zhong. 2015. On the chargeability characteristics of rock and ore from Xiarihamu Cu - Ni sulfide deposit and its prospecting significance in east Kunlun ,Qinghai Province [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration ,37 ( 2 ) : 177 - 181 ( in Chinese with English abstract )
- Pan Tong. 2015. The prospecting for magmatic liquation type nickel deposits on the southern and northern margin of Qaidam Basin ,Qinghai Province: A case study of the Xiarihamu Ni - Cu sulfide deposit [J]. Geology in China ,42 ( 3 ) : 713 - 723 ( in Chinese with English abstract )
- Wang Xin-chun ,Dou Zhi ,Zheng Xue-ping ,Deng Xiao-hong ,Li Lei. 2015. The method effective experiment of transient electromagnetic in xiarihamu nickle copper [J]. Geophysical and Geochemical Exploration ,39 ( 4 ) : 733 - 737 ( in Chinese with English abstract )
- Yan Yong-bang ,Wang Hai-peng ,Yan Hong. 2016. The 1 : 50000 aeromagnetic anomaly of the Xiarihamu magmatic liquation type copper - nickel sulfide deposit in Qinghai Province and its prospecting significance [J]. Geophysical and Geochemical Exploration ,40 ( 2 ) : 250 - 256 ( in Chinese with English abstract )
- Yang Qi-an ,Wu Shu-kuan ,Wang Zhi-an. 2015. A discovery of the super - large nickel deposit in the Xiarihamu area ,Golmud city ,Qinghai Province [J]. News Letters of China Geological Survey ,1 ( 4 ) : 11 - 12 ( in Chinese )
- Yao Zhuo-sen ,Qin Ke-zhang. 2014. Geophysical exploration for magmatic Cu - Ni sulfide deposits in the orogenic belt: current status ,problems and vistas [J]. Progress in Geophysics ,29 ( 6 ) : 2800 - 2817 ( in Chinese with English abstract )
- Yu Sheng ,Meng Zhen ,You Guan-jin ,Bai Chong-wei ,Wang Xiao-chun ,Liu Zai-ming. 2016. Application of integrated geophysical and geochemical methods to prospecting of the Xikougou molybdenum deposit [J]. Geology and Exploration ,52 ( 5 ) : 0838 - 0845 ( in Chinese with English abstract )
- Zhang Ai-kui ,Mo Xuan-xue ,Li Yun-ping ,Lü Jun ,Cao Yong-liang ,Shu Xiao-feng ,Li Hua. 2010. New progress and significance in the Qimantag metallogenic belt prospecting ,western Qinghai ,China [J]. Geological Bulletin of China ,29 ( 7 ) : 1062 - 1074 ( in Chinese with English abstract )
- Zhang Wen-quan ,Bai Guo-long ,Ma Jin-zhong. 2011. Application of CSAMT to exploration of Hutouya polymetallic deposit in Qinghai province [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research ,26 ( 4 ) : 453 - 457 ( in Chinese )
- Zhang Zhao-wei ,Li Wen-yuan ,Qian Bing. 2015. Metallogenic epoch of the Xiarihamu magmatic Ni - Cu sulfide deposit in eastern Kunlun orogenic belt and its prospecting significance [J]. Geology in China ,42 ( 3 ) : 438 - 451 ( in Chinese with English abstract )

#### 【附中文参考文献】

- 白国龙 ,何书跃 ,赵 勇 ,张 勇 ,张 鹏. 2015. CSAMT 法在祁漫塔格隐盲矿勘查中的应用效果 - 以卡而却卡矿区为例 [J]. 物探化探计算技术 ,37 ( 5 ) : 606 - 609
- 陈伟军 ,洪万华 ,郝情情 ,褚少雄 ,邢宝山. 2016. 大功率激电法和连续电导率测深在赤峰 - 朝阳金矿化集中区快速找矿评价中的应用 [J]. 地质与勘探 ,52 ( 1 ) : 0152 - 0158
- 杜 玮 ,凌锦兰 ,周 伟. 2014. 东昆仑夏日哈木镍矿床地质特征与成因 [J]. 矿床地质 ,33 ( 4 ) : 713 - 726
- 范长安 ,严勇邦 ,王宜庆. 2013. 高精度磁测在祁漫塔格它西地区的应用效果 [J]. 物探化探计算技术 ,35 ( 1 ) : 28 - 33
- 郭友钊 ,郭心玮 ,李 磊 ,王兴春. 2016. 东昆仑夏日哈木铜镍硫化物矿床岩石密度特征与重力勘探问题 [J]. 工程地球物理学报 ,13 ( 1 ) : 1 - 6
- 郭友钊 ,郭心玮 ,王兴春. 2015. 东昆仑夏日哈木铜镍硫化物矿床成矿作用的磁参数  $Q$  值试研究 [J]. 物探与化探 ,39 ( 6 ) : 1278 - 1283
- 何书跃 ,陈海福 ,田三春 ,张爱奎 ,郭桂兰. 2010. 青海祁漫塔格地区找矿勘探新进展 [J]. 矿床地质 ,29 ( 1 ) : 657 - 658
- 何书跃 ,舒树兰 ,刘永乐. 2013. 青海祁漫塔格地区有效找矿方法总结 [J]. 矿床地质 ,32 ( 1 ) : 187 - 194
- 黄力军 ,刘瑞德 ,陆桂福. 2004. 电法在寻找隐伏金属矿方面的定位预测作用 [J]. 物探与化探 ,28 ( 1 ) : 277 - 282
- 李百祥 ,腾汉仁 ,辛承奇. 1999. 黑山铜镍矿重磁电异常解释 [J]. 甘肃地质学报 ,8 ( 2 ) : 65 - 71
- 李东生 ,张文权 ,田承盛 ,颜 深 ,王丽君 ,景向阳. 2013. 青海祁漫塔格地区主要矿床类型找矿方法探讨 [J]. 西北地质 ,46 ( 4 ) : 131

- 141

- 李天虎, 罗先熔, 彭桥梁. 2012. 甘肃金川铜镍矿床 I 矿区深部边部地质-地电化学-地球物理多元信息成类预测[J]. 地质通报, 31(7): 1192-1200
- 吕琴音, 敬荣中. 2015. 东昆仑夏日哈木铜镍硫化物矿的岩矿石极化率特征及其找矿意义[J]. 物探化探计算技术, 37(2): 177-181
- 潘 彤. 2015. 青海省柴达木南北缘岩浆熔离型镍矿的找矿-以夏日哈木镍矿为例[J]. 中国地质, 42(3): 713-723
- 王兴春, 窦 智, 郑学萍, 邓晓红, 李 磊. 2015. 夏日哈木铜镍矿区瞬变电磁法有效性试验[J]. 物探与化探, 39(4): 733-737
- 严永邦, 王海鹏, 严 鸿. 2016. 青海夏日哈木岩浆熔离型铜镍硫化物矿床 1:5 万航磁异常特征及找矿意义[J]. 物探与化探, 40(2): 250-256
- 杨启安, 吴树宽, 王治安. 2015. 青海格尔木夏日哈木地区发现超大型

镍矿[J]. 中国地质调查成果快讯, 1(4): 11-12

- 姚卓森, 秦克章. 2014. 造山带中岩浆铜镍硫化物矿床的地球物理勘探: 现状、问题与展望[J]. 地球物理学进展, 29(6): 2800-2817
- 俞 胜, 蒙 轸, 尤关进, 柏崇伟, 王小春, 刘在铭. 2016. 物化探综合找矿方法在西口沟钼矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 52(5): 0838-0845
- 张爱奎, 莫宣学, 李云平, 吕 军, 曹永亮, 舒晓峰, 李 华. 2010. 青海西部祁漫塔格成矿带找矿新进展及其意义[J]. 地质通报, 29(7): 1062-1074
- 张文权, 白国龙, 马金忠. 2011. CSAMT 法在青海省虎头崖多金属矿勘查中的应用[J]. 地质找矿论丛, 26(4): 453-457
- 张照伟, 李文渊, 钱 兵. 2015. 东昆仑夏日哈木岩浆铜镍硫化物矿床成矿时代的厘定及其找矿意义[J]. 中国地质, 42(3): 438-451

## Effectiveness Experiments of Geophysical Methods in the Qimantage Metallogenic Belt of Qinghai Province

GAO Peng, GENG Tao, JI Xian-kun, DU Hui, BAI Yun, TIAN Zhong-ying, LIU Sheng-rong

(MLR Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an, Shaanxi 710054)

**Abstract:** With the deep development of mineral resources and geological surveys in the Qimantage metallogenic belt of Qinghai, geophysical methods are playing a more and more important role, especially in the prospecting of concealed deposits. The experiments and demonstration work of the geophysical methods including gravity, magnetism, IP intermediate gradient, CSAMT and AMT, have been conducted in the Xiarihamu nickel mine area and its periphery, which hosts typical topographic features in the Qimantage metallogenic belt in Qinghai. The results show that these methods are effective in the mineral resources and geological surveys in this area after solving some technical problems in the implementation process. Further summaries suggest that when geophysical methods are used to investigate the focused areas, the high-precision gravity, magnetic and IP intermediate gradient surveys at scales greater than 1:10000 should be carried out first, followed by fine analysis of the measured anomalies. Based on them, IP and electromagnetic sounding are made successively, permitting to determine depths of geological bodies in the subsurface. Finally, a comprehensive analysis on the metallogenic prospect is performed. This paper summarizes the effectiveness experiments of geophysical methods which can be used as a reference for the selection of geophysical methods in the mineral resources and geological survey in the Qimantage metallogenic belt of Qinghai.

**Key words:** geophysical method, Qinghai Province, Qimantage, effectiveness experiment

